Über den
Austritt negativer Jonen aus einigen glühenden Metallen und aus glühendem Calciumoxyd.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät

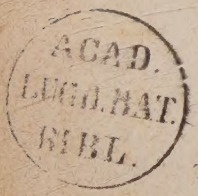
der

Friedrich-Alexanders-Universität zu Erlangen

vorgelegt von

Fritz Deininger

aus Ditterswind.



Tag der mündlichen Prüfung: 31. Oktober 1907.

Erlangen.

K. B. Hof- und Universitätsbuchdruckerei von Junge & Sohn.

1907.

54

Referent: Herr Professor Dr. E. Wiedemann.

Dekan: Herr Professor Dr. H. Lenk.

Meinen lieben Eltern

gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549813_0145

Inhalt[1]).

A. Grundlegende Beobachtungen und Theorieen I. über glühende Metalle und II. über glühende Metalloxyde.
B. Die Versuche. I. Die Versuchsanordnung: 1. Rohr und Luftpumpe. 2. Die untersuchten Drähte. 3. Die Schaltung. 4. Die Temperaturmessung. II. Die Versuchsdaten.
C. Die Versuchsresultate.

A. Grundlegende Beobachtungen und Theorieen.

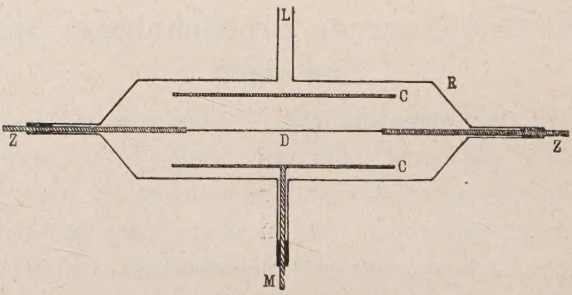
Auf das eigentümliche Verhalten glühender Metalle die sonst isolierende Luft ihrer Umgebung zum Leiter der Elektrizität zu machen ist man schon vor etwa zweihundert Jahren aufmerksam geworden[2]). Die damals beobachteten Erscheinungen waren jedoch viel zu kompliziert, als daß ihre Ursachen ohne weiteres

[1]) Die Ausführung der folgenden Versuche wurde wesentlich dadurch erleichtert, daß Herrn Prof. Dr. E. Wiedemann zur Untersuchung der Erscheinungen in heißen Gasen in dankenswerter Weise von dem Elisabeth Thompson Fund Mittel zur Verfügung gestellt wurden; aus ihnen wurden einige der benutzten Apparate angeschafft.

[2]) Historische Übersicht in J. J. Thomson, Conduction of Electricity through Gases, p. 155. Desgl. in G. Wiedemann, Lehre von der Elektrizität, Bd. 4, p. 864 ff. 1885.

hätten erkannt werden können. In neuerer Zeit ist es auf Grund der zahlreichen Arbeiten über elektrische Entladungsvorgänge in verdünnten Gasen eher möglich für das Verhalten des glühenden Metalles im elektrischen Felde eine Erklärung zu finden. Bei den zu diesem Zweck angestellten Untersuchungen wurde zunächst der komplizierende Einfluß, den das umgebende Gas entsprechend seiner Natur und seinem Druck auf das Verhalten des glühenden Drahtes ausübt, dadurch wesentlich zum Wegfall gebracht, daß man den Draht in evakuiertem Raum galvanisch glühte. Figur 1 zeigt schematisch die einfachste Form des hiezu verwendbaren Apparates im Querschnitt.

Figur 1.



Ein Platindraht D ist in dem Rohre R axial ausgespannt, indem er an die zwei luftdicht eingekitteten Drähte Z, Z angelötet ist. Dieselben führen den Heizstrom zu, der von einer isolierten Stromquelle kommt. Um ein elektrisches Feld zu erhalten, schaltet man den einen der Zuführungsdrähte Z an den einen Pol einer Batterie, während deren anderer Pol durch den Draht M mit einem Metallzylinder C verbunden wird, der koaxial zum Draht und von ihm isoliert im Rohre

angebracht ist. In den Stromkreis der Batterie ist ein Galvanometer eingeschaltet. Wird in dem bis auf ca 0,001 mm Druck evakuierten Rohr der Draht geglüht, und befindet er sich auf positivem, der Metallzylinder auf negativem Potential, so geht unter normalen Bedingungen [1]) kein Strom durch das Vakuum, also auch nicht durch das Galvanometer. Dagegen zeigt letzteres bei umgekehrter Schaltung der Batteriepole einen beträchtlichen Strom an. Das Rohr läßt also den Strom nur in einer Richtung durch. Hält man die Temperatur des Drahtes konstant und steigert die Potentialdifferenz von 0 an, so beobachtet man, daß der Strom nicht dem Ohmschen Gesetz folgt, indem er bald trotz steigender Spannung einen fast konstanten Wert, seinen sogenannten Sättigungswert erreicht. Steigert man die Temperatur des Drahtes gleichmäßig, so ergibt sich, daß die Sättigungswerte äußerst stark zunehmen.

Einen Einblick in diese Vorgänge erhält man durch die Theorie der Jonen. Man macht die grundlegende Annahme, daß die hohe Temperatur des Drahtes irgendwie Anlaß gibt zur Entstehung von negativen Elektronen [2]). Ein Teil derselben wird durch das elektrische Feld vom Drahte fort zur positiven Elektrode hin bewegt und vermittelt so die Strömung durch das Vakuum. Bei gesteigerter Feldstärke wächst auch die Anzahl der in der Sekunde fortgeführten Elektronen und wird schließlich so groß wie die Anzahl der in der gleichen Zeit entstehenden negativen Jonen. In diesem Fall ist das oben erwähnte Stadium

[1]) Vgl. J. J. Thomson, Electricity through Gases p. 213.

[2]) Bestimmung von ε/μ für negat. Jonen aus glühender Kohle. J. J. Thomson, Phil. Mag. V. Bd. 48. p. 547. 1899.

des Sättigungsstromes erreicht. Um den Zusammenhang zwischen Sättigungsstrom und Temperatur zu erklären, hat O. W. Richardson[1]) die folgenden zwei weiteren Annahmen gemacht: 1. Im Metall sind negative Elektronen vorhanden, welche sich darin wie Moleküle eines idealen Gases verhalten. 2. An der Oberfläche des Metalles herrscht ein Pontentialsprung, welcher die Elektronen am Entweichen aus dem Metall hindert. Bei der absoluten Temperatur Θ mögen pro Sekunde N_Θ Elektronen durch die Oberflächeneinheit des Drahtes treten. Nach der gegeben Definition des Sättigungsstromes ist dann bei der genannten Temperatur seine Dichte in elektrostatischem Maße

$$C_\Theta = \varepsilon \cdot N_\Theta \qquad (1)$$

Dabei bedeutet ε die Ladung eines Elektrons in elektrostatischen Einheiten. Man erhält demnach den Zusammenhang zwischen Drahttemperatur und Sättigungsstrom, wenn man N_Θ als Funktion von Θ darstellt. Dies ermöglicht das Maxwell-Boltzmannsche Geschwindigkeitsverteilungsgesetz, das unter Voraussetzung der 1. Annahme auf die Elektronen angewendet wird. Die Gesamtzahl der im Einheitsvolumen des Metalles vorhandenen Elektronen sei gleich n. Die Geschwindigkeit jedes Elektrons werde zerlegt in drei zu einander senkrechte Komponenten u, v und w, von denen die erste, u, zur Metalloberfläche senkrecht sei. Das genannte Gesetz gibt dann die Anzahl $N_{(u,v,w)}$ derjenigen Elektronen im Einheitsvolumen des Metalles, deren Geschwindigkeitskompo-

---

[1]) O. W. Richardson, Proc. Cambr. Phil. Soc. 11. p. 286. 1901.

nenten zwischen u und u + du, v und v + dv, w und w + dw liegen, durch die Gleichung

$$N_{(u,v,w)} = n\left(\frac{m}{2\pi R\Theta}\right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m}{2R\Theta}(u^2+v^2+w^2)} \cdot du \cdot dv \cdot dw.$$

R bedeutet hierin die Gaskonstante für ein Elektron und m dessen Masse. Von diesen Elektronen treffen in der Sekunde $u \cdot N_{(u,v,w)}$ auf die Oberflächeneinheit des Metalles; jedoch können nach der 2. Annahme nur diejenigen Elektronen durch die Metalloberfläche treten, deren in Richtung u genommene Bewegungsenergie größer ist als ein bestimmter Wert Φ; d. h. es muß $\frac{mu^2}{2} > \Phi$ oder $u > \sqrt{\frac{2\Phi}{m}}$. Somit ergibt die Summation für N_Θ den Ausdruck:

$$N_\Theta = \int_{\sqrt{\frac{2\Phi}{m}}}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u \cdot n\left(\frac{m}{2\pi R\Theta}\right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m}{2R\Theta}(u^2+v^2+w^2)} \cdot du \cdot dv \cdot dw \qquad (2)$$

Aus (1) und (2) ergibt sich für den Zusammenhang zwischen C_Θ und Θ die Gleichung

$$C_\Theta = \varepsilon \cdot n \sqrt{\frac{R\Theta}{2m\pi}} \cdot e^{-\Phi/R\Theta} = A \cdot \sqrt{\Theta} \cdot e^{-B/\Theta} \qquad (3).$$

A und B sind konstante Größen. Um zu prüfen, ob experimentell gefundene Werte von C_Θ und Θ die Gleichung (3) befriedigen, hat Richardson dieselbe logarithmiert und so eine Gleichung von der Form

$$y = a - bx \qquad (4)$$

erhalten, worin $y = \log C_\Theta - {}^1/_2 \log \Theta$; $x = 1/\Theta$; $a = \log A$ und $b = B \log e$ ist. Die aus C_Θ und Θ berechneten Werte von x und y müssen daher nach Richardsons Theorie im Diagramm auf einer Geraden

liegen. Richardson fand die aus seinen Voraussetzungen erhaltenen Folgerungen zunächst durch Experimente mit glühendem Platin bestätigt. Weiter beobachtete er bei der Untersuchung von glühender Kohle[1]) dieselben charakteristischen Erscheinungen wie bei glühendem Platin. Doch war die Emission aus Kohle bedeutend stärker als bei jenem Metall.

Herr Prof. Dr. A. Wehnelt[2]) hat gezeigt, daß Platindraht, der auf seiner Oberfläche gewisse Metalloxyde trägt, in glühendem Zustand in viel höherer Zahl Elektronen aussendet als reines Platin und als reine Kohle. Um den Einfluß verschiedener Metalloxyde auf die Jonenbildung qualitativ zu untersuchen, trug er dieselben auf Platinkathoden auf und beurteilte nach der Erniedrigung des Kathodenfalles, die beim Glühen der einzelnen Kathoden eintrat, die Wirksamkeit der Metalloxyde. Als besonders wirksam erwiesen sich die Oxyde der Erdalkalimetalle Baryum, Strontium und Calcium. Letzteres erhöhte, wie quantitative Messungen ergaben, das Emissionsvermögen eines Platindrahtes rund auf das 1000fache. Die Richardsonsche Formel wurde durch Wehnelts Untersuchung auch für oxydbedecktes Platin bestätigt. Diese Versuchsergebnisse haben Wehnelt veranlaßt, die Fähigkeit zur Aussendung negativer Jonen allein den wirksamen Metalloxyden zuzuschreiben. Die bei glühendem Platin und bei glühender Kohle auftretenden Erscheinungen würden nach Wehnelt auf noch vorhandene Verunreinigungen durch solche Oxyde zurückzuführen sein. Im Gegensatz hiezu ist nach Richard-

---

[1]) O. W. Richardson, Thil. Trans. 201 p. 518—32. 1903.
[2]) A. Wehnelt, Ann. d. Phys. 14, p. 425. 1904.

son die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, daß die negativen Jonen aus dem Metall selbst stammen, und daß auf dessen Oberfläche vorhandenes wirksames Metalloxyd lediglich modifizierend auf das Austreten der negativen Jonen wirkt, insofern als es die oben mit Φ bezeichnete Arbeit herabsetzt, welche ein Elektron beim Verlassen des Metalles leistet. Eine Entscheidung dieser Frage wird möglicherweise herbeigeführt, wenn verschiedene Metalle, die in reinem Zustand bezüglich ihrer Emissionsfähigkeit sich beträchtlich unterscheiden, mit ein und demselben wirksamen Oxyd bedeckt und untersucht werden. Ich habe in dieser Hinsicht mit Platin, Kohle, Tantal und Nickel sowohl bei fehlender als auch bei vorhandener Bedeckung mit Calciumoxyd Versuche angestellt, deren Anordnung und Ergebnisse im Folgenden beschrieben sind.

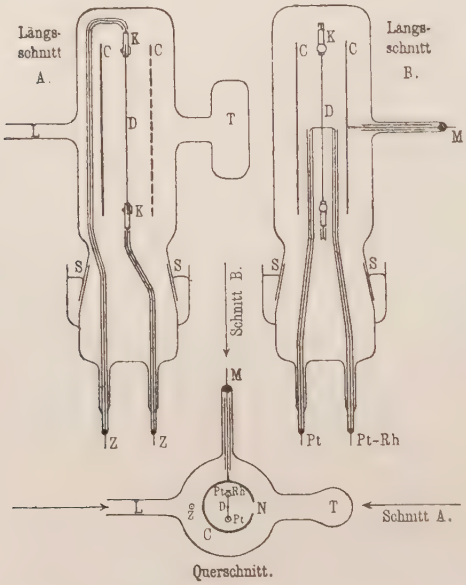
B. Die Versuche.

I. Die Versuchsanordnung.

Die Anordnung des benutzten Rohres zeigt Figur 2. Der Versuchsdraht D ist längs der Rohraxe angebracht und, um ihn leicht auswechseln zu können, durch Schrauben in den Klemmen K, K an den stromzuführenden Drähten Z, Z befestigt. Letztere bestehen aus je einer Anzahl von dünnen Kupferdrähten und werden durch je eine Glasröhre isoliert und versteift. Zur Messung der Temperatur des Drahtes sind in dessen Mitte die beiden (0,025 mm dicken) Drähte Pt und Pt-Rh eines Thermoelementes angelötet und führen, durch Glasröhren isoliert und gehalten, in der durch die Figur angegebenen Weise nach außen. Durch vier Doppellötungen und ebensoviele Einschmelz-

stellen ist das System, das Draht und Thermoelement enthält, im unteren Teil des Rohres befestigt. Im oberen Teil desselben ist koaxial zum Draht der

Figur 2.



Messingzylinder C (3 cm Durchmesser) an einem in ihn seitlich eingeschraubten starken Draht M angebracht. Ein großer Schliff S sowie ein Längsspalt N am Messingzylinder ermöglichen es den unteren Teil des Rohres aus dem oberen und aus dem Messingzylinder herauszunehmen, wenn das Auswechseln der Drähte, das Bestreichen derselben mit Calciumnitrat (s. unten!) oder das Anlöten des Thermoelementes nötig ist. Mit der Zeit der Benutzung des Rohres verliert die dem Spalt N gegenüberliegende Rohrwand infolge der Metallzerstäubung des Drahtes an Durchsichtigkeit und erschwert die Beobachtung des letzteren.

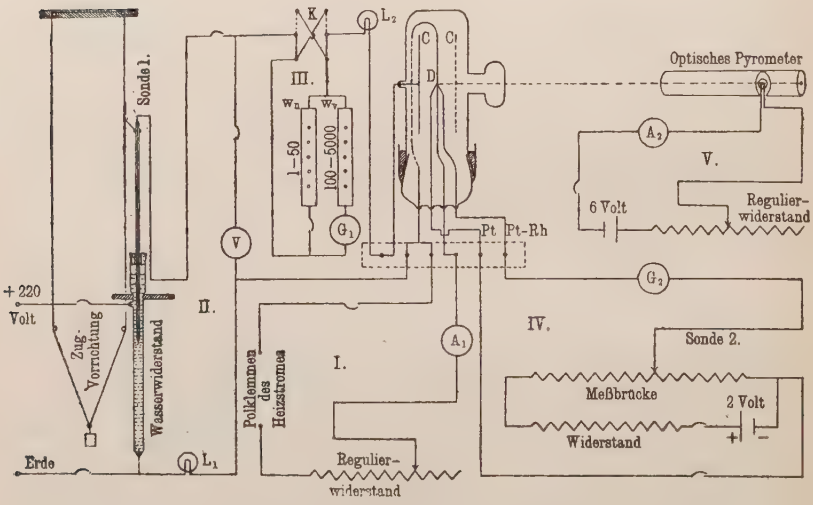
Da in weiterer Entfernung vom Draht das Glas von niedergeschlagenem Metall frei bleibt, ist an entsprechender Stelle ein Tubus angeblasen mit einem kleineren Rohr T, dessen Axe dem Draht parallel ist. Auf diese Weise ist das Ansetzen eines Tubus mit aufgekitteter planparalleler Glasplatte umgangen. Überhaupt wurde das Kitten mit Siegellack oder Wasserglas völlig vermieden. Die Stromzuführung wurde durch eingeschmolzene Platindrähte vermittelt. Der Schliff S war durch Quecksilber gedichtet. Das Evakuieren des Rohres erfolgte durch eine ausschließlich mit Quecksilberabschlüssen versehene Sprengel'sche Fallluftpumpe. Eine zuerst benutzte, mit Fettschliffen gedichtete Pumpe erwies sich als ungeeignet. Alle Verbindungsröhren waren möglichst kurz und weit. Der Druck wurde durch ein Mac Leod-Manometer gemessen. Nach dem Auspumpen wurde der Draht längere Zeit bei gleichzeitig arbeitender Pumpe geglüht: es wurde schließlich erreicht, daß während der Versuche der Druck im Rohre unterhalb 0,001 mm gehalten werden konnte.

Die Dimensionen der untersuchten Drähte waren nur wenig verschieden (Platin 0,23 mm, Kohle 0,27 mm, Tantal und Nickel 0,25 mm Drahtdurchmesser; Länge der Drähte 9,5 cm, bei Kohle nur 9 cm). Aus den beobachteten Stromstärken wurden diejenigen für 1 Quadratzentimeter berechnet. Den Platin- und Nickeldraht erhielt ich von der Firma Herräus in Hanau, den Tantaldraht von der A.-G. Siemens und Halske in Berlin, die Kohlefäden von der hiesigen Firma Reiniger, Gebbert und Schall. Um das Einschrauben der Kohle in die Klemmen K, K möglich zu machen, wurden an den Enden von 9 cm

langen Kohlefäden kurze Stücke Eisendraht hart angelötet. Je ein und derselbe Draht wurde zuerst ohne und darnach bei Bedeckung mit Calciumoxyd untersucht. Die Herstellung der Calciumoxydschicht geschah in folgender Weise. Der Draht wurde mit einer Lösung von Calciumnitrat bestrichen, dann das Lösungswasser durch mäßiges, auf galvanischem Weg bewirktes Erwärmen des Drahtes verdampft, und schließlich im evakuierten Raum durch Glühen des Drahtes das Nitrat in das Oxyd übergeführt.

Die Figur 3 zeigt schematisch die Anordnung der Versuchsschaltung. Die Heizvorrichtung wird durch

Figur 3.



den mit I. bezeichneten Teil der Figur dargestellt. Das Glühen des Drahtes erfolgte, um störenden Zweigstrom durch das Thermoelement zu vermeiden, durch entsprechend transformierten und regulierten Wechselstrom, der je nach Bedarf aus der Wechselstrom-

maschine des hiesigen physikalischen Institutes oder durch einen Gleichstrom-Wechselstromumformer aus dem Gleichstrom der hiesigen Zentrale erhalten wurde. Die sekundäre Spule des benutzten Transformators war gut isoliert. Die Vorrichtung zur Herstellung des elektrischen Feldes gibt Teil II der Figur. Strom aus der Erlanger Zentrale (positiver Pol auf + 220 Volt) geht durch den Wasserwiderstand W zur Erde. Im Wasser des Widerstandes ist durch eine Zugvorrichtung die Sonde S_1 verschiebbar, wodurch das Potential des Messingzylinders C zwischen 0 und + 220 Volt variiert werden kann, ohne daß dabei sprungweise Änderungen erfolgen [1]). Der Draht D ist geerdet. Ein Präzisionsvoltmeter V zeigt die Potentialdifferenz zwischen C und D an. Zur Messung der Strömung zwischen C und D dient der in Figur 3 durch Teil III dargestellte Apparat. Derselbe ist gut isoliert aufgestellt. Der Meßbereich der Vorrichtung hat eine sehr große Ausdehnung infolge der in weiten Grenzen regulierbaren Widerstände w_v und w_n, die dem Galvanometer G_1 (Empfindlichkeit rund $3{,}5 \cdot 10^{-8}$ Ampère) vor bezw. parallel geschaltet sind. Durch den Kommutator K kann zur Erzielung einer genauen Ablesung die Richtung des durch G_1 gehenden Stromes umgekehrt werden.

Die Temperaturmessung wurde bei den endgültigen Versuchen ausschließlich mit einem Thermoelement ausgeführt. Die Drähte desselben, aus Platin und Platin-Rhodium (10%), waren von Herräus in Hanau bezogen. Ihr Durchmesser betrug 0,025 mm. Es gelang die Drahttemperaturen in den (acht) defini-

[1]) A. Wehnelt, loc. cit. p. 441.

tiven Versuchen mit einem und demselben Thermoelement zu messen. Das Anlöten desselben an den Draht D geschah nicht, wie sonst üblich, im Knallgasgebläse (— die Methode hätte beim Anlöten an Nickel, Kohle und Tantal versagt —) sondern in folgender Weise: Die beiden Drähte des Thermoelementes wurden zunächst möglichst nahe aneinander in der Mitte des Versuchsdrahtes irgendwie befestigt. Dann wurde ein kleiner Tropfen Platinchloridlösung an die betreffende Stelle gebracht, durch mäßiges Erwärmen mittels elektrischen Stromes das Lösungswasser verdampft und schließlich im evakuierten Rohr durch Glühen des Drahtes das Platinchlorid in Platin übergeführt. Es gelang dies schon bei einer Drahttemperatur von 1200°, so daß das Verfahren auch beim Löten an Nickeldraht angewendet werden konnte. Um das Thermoelement zu aichen, bestimmte ich die thermoelektromotorische Kraft desselben bei einigen bekannten Temperaturen der ersten Lötstelle (— zweite Lötstelle auf 0° —). Als solche Fixpunkte wurden benutzt 1. der Schmelzpunkt von Gold, 1063° (Drahtstückmethode); 2. der Schmelzpunkt von Aluminium, 657° (Tiegelmethode); 3. der Siedepunkt von Schwefel, 444° (Sieden im Kolben); 4. der Schmelzpunkt von Zink, nahe 412° (Tiegelmethode). Die beobachteten elektromotorischen Kräfte verglich ich mit den Werten, die L. Holborn und S. Valentier[1]) bei denselben Fixpunkten für Pt und Pt-Rh (10%) gefunden haben. Die Abweichungen von diesem Normalelement betrugen pro 100 Milli-Volt bei Gold — 0,49 M.V., bei

[1]) L. Holborn und S. Valentier, Ann. d. Phys. 22. p. 27, 1907.

Aluminium +0,17 M.V., bei Schwefel —0,13 M.V., bei Zink 0,00 M.V. Diese gute Übereinstimmung veranlaßte mich, die Aichungskurve aus der zitierten Abhandlung auf das benutzte Thermoelement anzuwenden. Die thermoelektromotorische Kraft wurde durch den in Teil IV der Figur 3 dargestellten Apparat kompensiert. Die Vorrichtung war wohl isoliert aufgestellt. Die Temperaturangaben, die ich bei kontrollierenden Versuchen durch ein bereits von anderer Seite geaichtes optisches Pyrometer[1]) (Teil V der Figur 3) erhielt, stimmten gut mit den durch Vorrichtung IV sich ergebenden Werten überein.

II. Die Versuchsdaten.

Die Versuchsdaten geben den Zusammenhang zwischen Spannung und Strom sowie die Abhängigkeit des Sättigungsstromes von der Drahttemperatur und zwar für Platin, Kohle, Tantal und Nickel bei fehlender und bei vorhandener Bedeckung mit Calciumoxyd. Die Daten für die mit Calciumoxyd bedeckten Drähte dürften von wesentlichen Fehlern frei sein. Dadurch daß in diesen Versuchen nicht sehr hohe Drahttemperaturen zur Anwendung kamen (nur bis 1200° Cels.), wurde der störende Einfluß der Metallzerstäubung ausgeschaltet. Die vier Versuche wurden bei fast gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt. Die chemische Reduktion des glühenden Calciumoxydes durch Kohlenwasserstoffe wurde verhindert, indem Fettschliffe und

---

[1]) L. Holborn und F. Kurlbaum, Ann. d. Phys. 11. p. 225. 1903.

Siegellackkittungen vermieden wurden; auf Reinhaltung von Rohr und Pumpe wurde Sorgfalt verwendet. Für nicht mit Calciumoxyd bedecktes Platin sind die angegebenen Werte vielleicht etwas zu groß, da in diesem Fall bei den hohen Drahttemperaturen (bis 1520^0) besonders starke Zerstäubung wahrgenommen wurde. Bei Tantal ohne Calciumoxyd wurde eine sehr starke Abnahme der Temperatur von der Mitte des Drahtes nach seinen Enden hin an der verschiedenen Helligkeit der betreffenden Stellen bemerkt. Die Daten für die Sättigungsströme dürften daher im genannten Fall etwas zu klein sein. Bei Nickel ohne Calciumoxyd erhielt ich bis zu der höchsten angewandten Drahttemperatur, 1310^0 Cels., keinen Strom durch das Galvanometer angezeigt, d. h. es war J kleiner als 10^{-8} Ampère. Dabei betrug die Spannung zwischen C und D (Figur 3) bis zu 220 Volt.[1]) In den folgenden Tabellen sind die Versuchsdaten enthalten.

Tabellen 1 bis 7 geben den Zusammenhang zwischen Spannung V und Strom J.

---

[1]) In einigen Vorversuchen erhielt ich bei durchschmelzenden Nickeldrähten momentan beträchtliche Ströme (nahe $5 \cdot 10^{-7}$ Ampère).

Tabelle 1.

Platin ohne CaO. T = 1483° Cels.

V (Volt)	J (10^{-8} A.)	V (Volt)	J (10^{-8} A.)
150	193,4	20	193,4
120	193,4	15	193,4
90	193,4	10	162,6
60	193,4	8	130,1
40	193,4	5	68,4
30	193,4	2	24,0
		0	0,0

Tabelle 2.

Platin mit CaO. T = 908° Cels.

V (Volt)	J (10^{-8} A.)	V (Volt)	J (10^{-8} A.)
120	87,3	30	87,3
110	89,0	25	85,6
100	89,0	20	84,5
90	89,0	15	83,9
80	87,3	10	73,6
70	87,3	8	70,0
60	89,0	5	40,1
50	89,0	2	5,1
40	90,7	0	0,0

Tabelle 3.

Kohle ohne CaO. T = 1294° Cels.

V (Volt)	J (10^{-8} A.)	V (Volt)	J (10^{-8} A.)
180	208,1	40	209,0
140	208,1	30	208,1
130	208,1	25	206,2
120	208,1	20	202,6
110	208,1	15	186,2
100	204,4	12	167,9
90	204,4	10	122,3
80	208,1	5	54,7
70	211,7	3	23,7
60	209,0	0	0,0
50	209,0		

Tabelle 4.

Kohle mit CaO. T = 912° Cels.

V (Volt)	J (10^{-8} A.)	V (Volt)	J (10^{-8} A.)
120	136,9	35	118,7
110	142,3	30	116,8
100	124,1	25	116,8
90	120,4	20	115,0
80	118,7	15	115,0
70	116,8	10	105,9
60	116,8	5	80,3
50	118,7	2	10,9
40	116,8	0	0,0

Tabelle 5.

Tantal ohne CaO. T = 1422° Cels.

V (Volt)	J (10^{-8} A.)	V (Volt)	J (10^{-8} A.)
140	97,5	20	94,1
100	97,5	15	92,4
70	97,5	10	78,7
50	97,5	8	61,6
40	97,5	5	51,3
30	97,5	2	8,6
25	95,8	0	0,0

Tabelle 6.

Tantal mit CaO. T = 907° Cels.

V (Volt)	J (10^{-8} A.)	V (Volt)	J (10^{-8} A.)
100	111,2	20	110,4
90	111,2	18	108,7
80	110,4	15	104,4
70	111,2	12	99,3
60	112,1	10	91,6
50	111,2	8	83,0
40	111,2	5	54,8
30	111,2	2	21,4
25	111,2	0	0,0

Tabelle 7.

Nickel mit CaO. T = 908° Cels.

V (Volt)	J (10^{-8} A.)	V (Volt)	J (10^{-8} A.)
120	85,6	20	85,6
90	85,6	15	80,4
70	85,6	10	73,6
50	85,6	8	61,6
40	85,6	5	46,2
30	85,6	2	20,5
25	85,6	0	0,0

Die Tabellen 8—14 geben den Zusammenhang zwischen Drahttemperatur (T; absolut = Θ) und Sättigungsstromdichte (J pro 1 cm²; elektrostatisch = C). Die beiden letzten Kolumnen dieser Tabellen enthalten die Werte $10^4/\Theta$ und $\log C - {}^1/_2 \log \Theta$, welche nach Richardson zur Prüfung der erwähnten Beziehung dienen.

Tabelle 8.

Platin ohne CaO.

T in ° Cels.	J pro 1 cm² in 10^{-8} Amp.	$10^4/\Theta$	$\log C - {}^1/_2 \log \Theta$
1519	486,0	5,58	2,54
1508	423,3	5,61	2,48
1498	360,7	5,65	2,41
1487	297,9	5,68	2,33
1477	243,1	5,71	2,24
1467	180,3	5,75	2,11
1456	129,7	5,78	1,97
1446	104,7	5,82	1,88
1436	81,0	5,85	1,77
1426	64,8	5,89	1,67
1416	49,4	5,92	1,56
1406	42,4	5,95	1,49
1396	32,4	5,99	1,38
1386	24,9	6,03	1,26
1376	18,7	6,06	1,14
1366	15,0	6,10	1,04
1356	12,5	6,14	0,97
1345	9,2	6,18	0,84
1335	8,0	6,22	0,78
1325	6,5	6,26	0,69
1314	5,2	6,30	0,60
1304	4,2	6,34	0,50

Tabelle 9.

Platin mit CaO.

T in ° Cels.	J pro 1 cm² in 10^{-8} Amp.	$\frac{10^4}{\Theta}$	log C— $\frac{1}{2}$ log Θ
1198	192000,0	6,80	5,18
1187	157000,0	6,85	5,09
1176	121000,0	6,90	4,98
1165	98700,0	6,95	4,89
1154	77200,0	7,01	4,79
1143	60700,0	7,06	4,68
1132	45500,0	7,12	4,56
1121	35400,0	7,17	4,45
1111	29100,0	7,23	4,37
1100	21900,0	7,28	4,25
1089	16800,0	7,34	4,14
1078	13300,0	7,40	4,03
1067	9690,0	7,46	3,90
1056	7400,0	7,52	3,78
1045	5610,0	7,59	3,67
1033	4200,0	7,66	3,54
1022	3230,0	7,72	3,43
1011	2260,0	7,79	3,28
1001	1820,0	7,85	3,18
990	1320,0	7,92	3,05
979	941,0	7,99	2,90
968	674,0	8,06	2,76
957	502,0	8,13	2,63
946	345,0	8,20	2,47
935	259,0	8,28	2,35
924	189,0	8,35	2,22
912	135,0	8,44	2,07
901	94,7	8,52	1,92
890	69,8	8,60	1,79
879	44,9	8,68	1,60
867	29,9	8,77	1,42
855	19,9	8,86	1,25
844	12,5	8,95	1,05
832	9,0	9,05	0,91
821	5,0	9,14	0,66
809	3,5	9,24	0,50
798	2,5	9,34	0,36
785	1,5	9,45	0,14

Tabelle 10.

Kohle ohne CaO.

T in ° Cels.	J pro 1 cm² in 10^{-8} Amp.	$\frac{10^4}{\Theta}$	log C — $\frac{1}{2}$ log Θ
1467	9940,0	5,75	3,85
1460	8930,0	5,77	3,81
1454	7760,0	5,79	3,75
1445	6570,0	5,82	3,68
1433	5080,0	5,86	3,57
1424	4120,0	5,89	3,48
1406	2950,0	5,95	3,34
1390	2130,0	6,01	3,19
1349	922,0	6,16	2,84
1338	710,0	6,21	2,72
1323	507,0	6,27	2,58
1302	328,0	6,35	2,39
1274	173,0	6,46	2,12
1338	707,0	6,21	2,72
1336	674,0	6,21	2,70
1332	621,0	6,23	2,67
1326	550,0	6,25	2,62
1319	468,0	6,28	2,55
1312	398,0	6,31	2,48
1304	334,0	6,34	2,40
1291	246,0	6,39	2,27
1280	193,0	6,44	2,17
1265	134,0	6,50	2,01
1250	95,1	6,57	1,86
1224	51,6	6,68	1,60
1202	31,1	6,78	1,39
1175	16,3	6,91	1,11
1148	8,6	7,04	0,84

Tabelle 11.

Kohle mit CaO.

T in ° Cels.	J pro 1 cm² in 10^{-8} Amp.	10^4 Θ	log C— $^1/_2$ log Θ
1184	239000,0	6,86	5,27
1174	166000,0	6,91	5,12
1164	125000,0	6,96	4,99
1153	86100,0	7,01	4,83
1143	69100,0	7,06	4,74
1132	46100,0	7,12	4,57
1121	35200,0	7,17	4,45
1110	26800,0	7,23	4,33
1099	21100,0	7,29	4,23
1088	18400,0	7,35	4,18
1077	13700,0	7,41	4,05
1066	10500,0	7,47	3,94
1055	8190,0	7,53	3,83
1044	5990,0	7,59	3,69
1033	4510,0	7,66	3,57
1022	3580,0	7,72	3,48
1011	2760,0	7,79	3,36
1000	1940,0	7,86	3,21
989	1490,0	7,92	3,10
978	1070,0	7,99	2,96
967	790,0	8,06	2,83
956	537,0	8,14	2,66
945	402,0	8,21	2,54
934	283,0	8,29	2,39
923	209,0	8,36	2,26
912	151,0	8,44	2,12
901	109,0	8,52	1,98
890	78,9	8,60	1,84
878	51,6	8,69	1,66
866	34,9	8,78	1,49
856	22,9	8,86	1,31
844	15,8	8,95	1,15
832	9,6	9,05	0,94
820	5,7	9,15	0,72
809	3,3	9,24	0,48
798	1,9	9,34	0,24
787	1,2	9,43	0,04

Tabelle 12.

Tantal ohne CaO.

T in ° Cels.	J pro 1 cm² in 10^{-8} Amp.	10^4 Θ	log C— $^1/_2$ log Θ
1573	1400,0	5,42	2,99
1562	1210,0	5,45	2,93
1552	1070,0	5,48	2,87
1542	932,0	5,51	2,82
1532	828,0	5,54	2,77
1522	721,0	5,57	2,71
1512	615,0	5,60	2,64
1501	519,0	5,64	2,57
1491	446,0	5,67	2,50
1481	361,0	5,70	2,41
1470	306,0	5,74	2,34
1460	260,0	5,77	2,27
1450	213,0	5,80	2,19
1440	187,0	5,84	2,13
1429	149,0	5,87	2,04
1419	124,0	5,91	1,96
1409	105,0	5,95	1,89
1399	88,0	5,98	1,81
1389	70,2	6,02	1,71
1379	58,3	6,05	1,63
1369	49,5	6,09	1,56
1358	42,7	6,13	1,50
1348	38,5	6,17	1,46
1338	33,5	6,21	1,40
1328	29,4	6,25	1,34
1318	26,1	6,28	1,29
1307	20,6	6,33	1,19
1297	17,0	6,37	1,11
1287	14,7	6,41	1,05
1276	11,9	6,45	0,96
1265	9,2	6,50	0,85
1254	7,8	6,55	0,78
1243	6,0	6,60	0,66
1232	4,6	6,64	0,55
1221	3,7	6,69	0,45
1210	3,2	6,74	0,40
1200	2,3	6,79	0,25

Tabelle 13.

Tantal mit CaO.

T in ° Cels.	J pro 1 cm² in 10^{-8} Amp.	10^4 Θ	log C— $^1/_2$ log Θ
1196	154000,0	6,81	5,08
1186	129000,0	6,85	5,00
1175	109000,0	6,91	4,93
1164	93700,0	6,96	4 87
1153	75700,0	7,01	4,78
1141	55900,0	7,07	4,65
1130	45400,0	7,13	4,56
1120	37800,0	7,18	4,48
1110	29700,0	7,23	4,38
1099	24600,0	7,29	4,30
1088	19000,0	7,35	4,19
1077	15400,0	7,41	4,10
1066	11600,0	7,47	3,98
1055	9030,0	7,53	3,87
1044	6690,0	7,59	3,74
1032	5510,0	7,66	3,66
1020	3970,0	7,73	3,52
1009	3000,0	7,80	3,40
999	2370,0	7.86	3,30
988	1640,0	7,93	3,14
977	1180,0	8,00	3,00
966	887,0	8,07	2,88
955	642,0	8,14	2,74
944	433,0	8,22	2,57
932	288,0	8,30	2,40
921	200,0	8,37	2,24
910	158,0	8,45	2,14
900	119,0	8,52	2,02
888	78,0	8,61	1,84
876	47,0	8,70	1,62
864	31,0	8,79	1,44
853	19,5	8,88	1,24
842	13,8	8,97	1,09
831	8,0	9,06	0,86
820	5,7	9,15	0,72
808	3,7	9,25	0,52
796	2,3	9,35	0,32
784	1,4	9,46	0,10

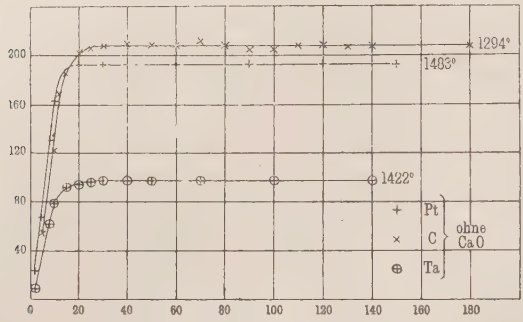
Tabelle 14.

Nickel mit CaO.

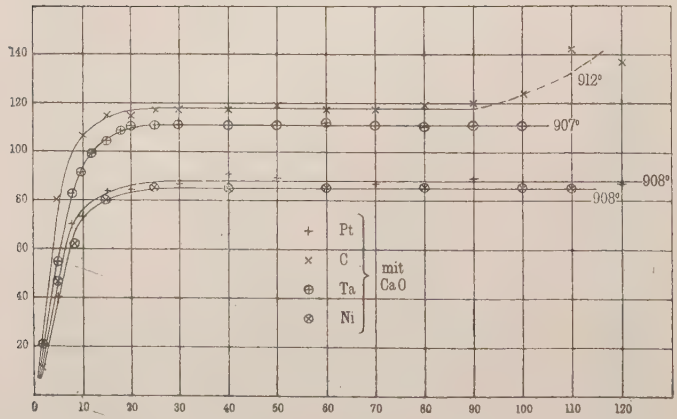
T in ° Cels.	J pro 1 cm² in 10^{-8} Amp.	$\frac{10^4}{\Theta}$	log C— $\frac{1}{2}$ log Θ
1198	157000,0	6,80	5,09
1187	128000,0	6,85	5,00
1176	106000,0	6,90	4,92
1165	88500,0	6,95	4,84
1154	70300,0	7,01	4,75
1143	54500,0	7,06	4,64
1132	41400,0	7,12	4,52
1121	33800,0	7,17	4,43
1111	26400,0	7,23	4,33
1100	21000,0	7,28	4,23
1089	16300,0	7,34	4,12
1078	12300,0	7,40	4,00
1067	9150,0	7,46	3,87
1056	6940,0	7,52	3,76
1045	5340,0	7,59	3,64
1033	3980,0	7,66	3,52
1022	2940,0	7,72	3,39
1011	2240,0	7,79	3,27
1001	1660,0	7,85	3,14
990	1260,0	7,92	3,03
979	831,0	7,99	2,85
968	577,0	8,06	2,69
957	539,0	8,13	2,66
946	356,0	8,20	2,49
935	215,0	8,28	2,27
924	183,0	8,35	2,20
912	132,0	8,44	2,06
901	83,5	8,52	1,86
890	58,7	8,60	1,71
879	43,6	8,68	1,59
867	30,3	8,77	1,43
855	22,9	8,86	1,31
844	15,1	8,95	1,13
832	10,1	9,05	0,96
821	7,3	9,14	0,82
809	5,0	9,24	0,66
798	3,2	9,34	0,47
785	2,3	9,45	0,33

Die folgenden Kurventafeln geben die Resultate der vorigen Tabellen graphisch wieder. Den Zusammenhang zwischen Spannung (Abszissen = Volt) und Strom (Ordinaten = 10^{-8} Ampère) stellt Kurventafel 1 für die nicht mit Calciumoxyd bedeckten und Kurventafel 2 für die mit Calciumoxyd bedeckten Drähte dar. Die Drahttemperaturen sind in den

Kurventafel 1.



Kurventafel 2.

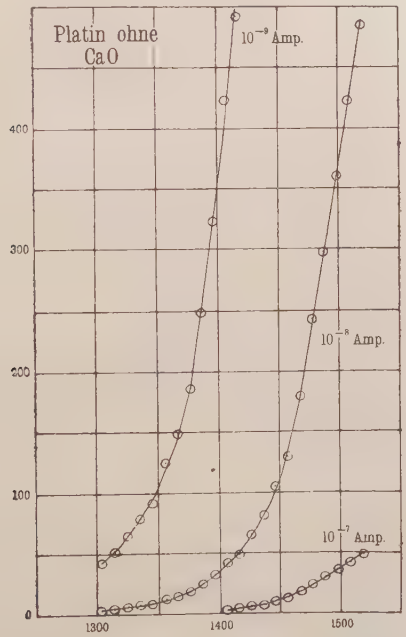


Tafeln bei den einzelnen Kurven vermerkt. Man ersieht aus den Kurven, daß der Charakter der be-

trachteten Beziehung in den verschiedenen Versuchen derselbe ist. Die Sättigung des Stromes wird überall zwischen 20 und 25 Volt erreicht.

Die Abhängigkeit des Sättigungsstromes (Ordinaten = Sättigungsstromdichte) von der Drahttemperatur (Abszissen = Temperatur in ° Celsius) wird für die nicht mit Calciumoxyd bedeckten Drähte durch die Kurventafeln 3. (Platin), 4. (Kohle) und 5. (Tantal) dargestellt.

Kurventafel 3.



Einige diesen Kurven entnommene Werte sind zu besserer Übersicht in der Tabelle 15 zusammengestellt. Die Zahlen in der Tabelle bedeuten die Dichte des Sättigungsstromes in 10^{-8} Ampère.

Kurventafel 4.

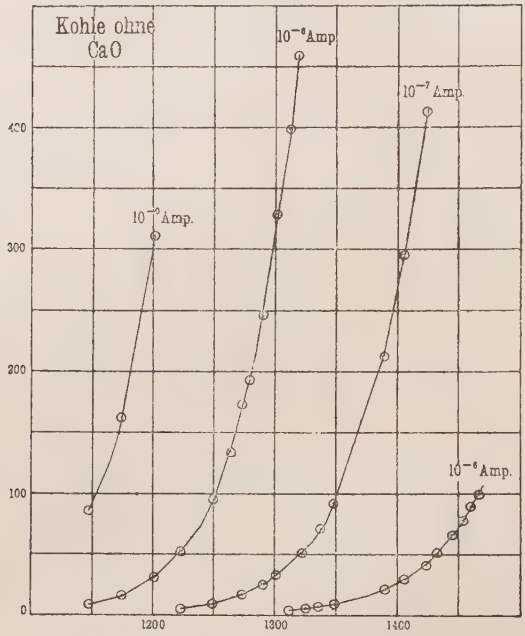
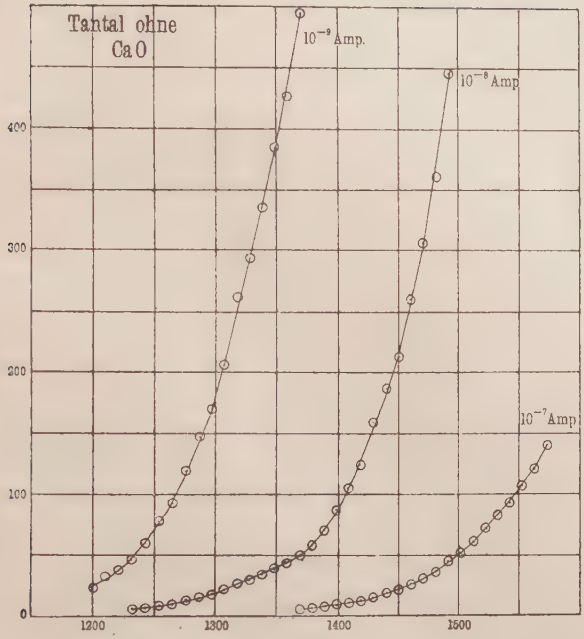


Tabelle 15.

Drahttemperatur	Platin ohne CaO	Kohle ohne CaO	Tantal ohne CaO	Nickel ohne CaO
1300°	4	300	20	< 1
1350°	11	950	40	?
1400°	35	2500	85	?
1450°	110	7000	200	50?

Man ersieht aus dieser Tabelle und aus den letzten drei Kurventafeln 3, 4 und 5, daß die Drähte aus verschiedenem Material, auf gleiche Temperatur gebracht, Sättigungsströme von beträchtlich verschiedener Stärke vermitteln. Auch unterscheiden sich die genannten Kurven (in Tafel 3, 4 und 5 in gleichem Maasstabe dargestellt!) durch ihren verschiedenartigen Verlauf.

Kurventafel 5.



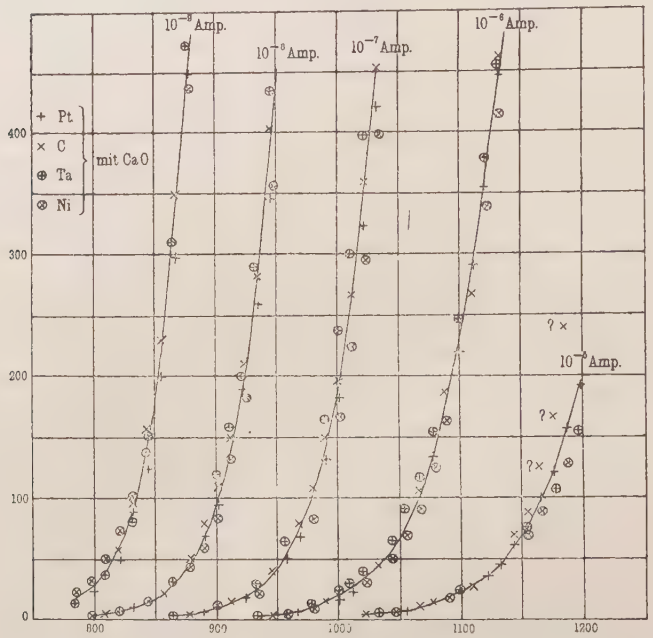
Die Kurventafel 6, gibt für die vier mit Calciumoxyd bedeckten Drähte den Zusammenhang zwischen Sättigungsstromdichte (Ordinaten) und Drahttemperatur (Abszissen = ° Cels.). Tabelle 16 stellt einige der Kurventafel 6 entnommene Werte vergleichend zusammen.

Tabelle 16.

Drahttemperatur	Platin mit CaO	Kohle mit CaO	Tantal mit CaO	Nickel mit CaO
800°	2,6	2,2	2,7	3,6
850°	16,0	20,0	18,0	19,3
900°	93,0	106,0	118,0	86,0
950°	410,0	460,0	560,0	400,0
1000°	1800,0	2000,0	2200,0	1600,0
1050°	6400,0	7200,0	8000,0	6200,0
1100°	21000,0	20000,0	25000,0	21000,0
1150°	73000,0	81000,0	71000,0	75000,0

Die Zahlen in der Tabelle bedeuten die Dichte des Sättigungsstromes in 10^{-8} Ampère.

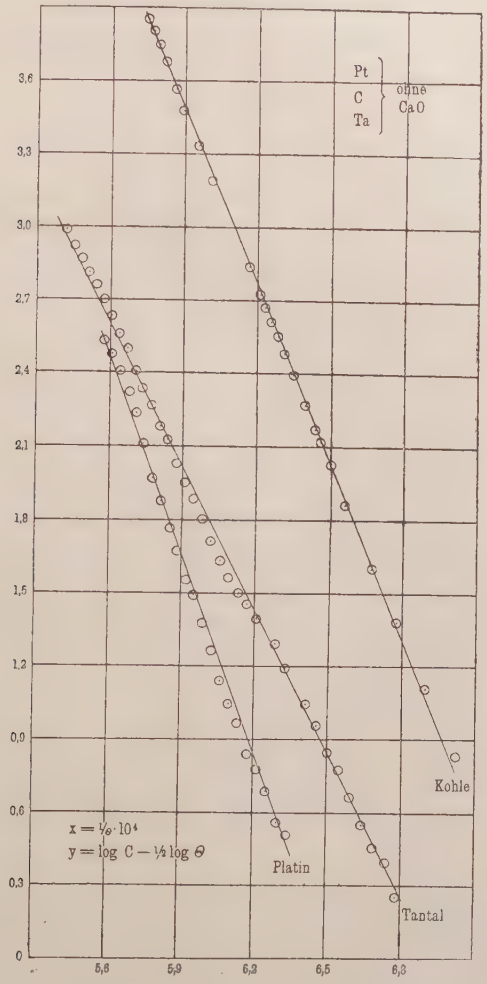
Kurventafel 6.



Aus den Tabellen 15 und 16 sowie aus den vier letzten Kurventafeln (3 bis 6) ist ersichtlich, daß zur Erreichung einer bestimmten Sättigungsstromdichte viel niedrigere Drahttemperaturen hinreichen, wenn die Drähte mit Calciumoxyd bedeckt sind, als wenn letzteres fehlt. Kurventafel 6 und Tabelle 16 zeigen, daß gleichen Temperaturen der mit Calciumoxyd bedeckten Drähte gleiche Sättigungsstromdichten entsprechen, daß also die vier Drähte trotz ihres verschiedenen Materiales bezüglich der Zahl der ausgesandten negativen Jonen sich nicht unterscheiden, wenn sie ein Schicht Calciumoxyd tragen. Den Zusammenhang zwischen den Größen $x = 10^4/\Theta$ (Abszissen) und $y = \log C - {}^1/_2 \log \Theta$

(Ordinaten) stellen für Platin, Kohle und Tantal ohne Calciumoxyd die Kurven der Tafel 7 graphisch

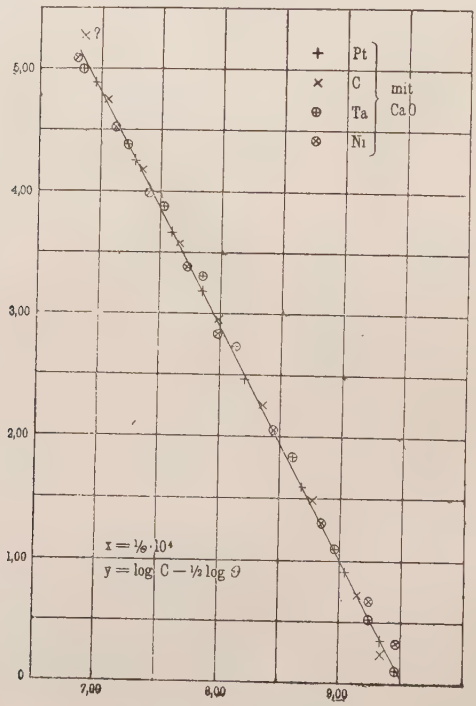
Kurventafel 7.



dar. Für Calciumoxyd tragenden Platin-, Kohle-, Tantal- und Nickeldraht wird diese Beziehung durch Kurventafel 8 gegeben.

Die Kurven der Tafeln 7 und 8 sind gerade Linien und bestätigen somit die Richardsonsche Formel (s. Einleitung) für sämtliche Versuche. Bei den mit Calciumoxyd bedeckten Drähten fallen die Geraden in eine einzige zusammen, während die Geraden für nicht

Kurventafel 8.



mit Calciumoxyd bedeckten Platin-, Kohle- und Tantaldraht verschiedene Lage einnehmen. Aus den Konstanten der in den beiden letzten Kurventafeln gezeichneten Geraden lassen sich die Werte von n d. i. der Zahl der negativen Jonen im Einheitsvolumen des Metalles, Φ d. i. die Arbeit, die ein Jon beim Ver-

lassen des Metalles leistet, und $\delta\varphi$ d. i. der Potentialsprung an der Metalloberfläche berechnen. Tabelle 17[1]) stellt diese Werte zusammen.

Tabelle 17.

	Platin	Kohle	Tantal	CaO (Mittel)
n	$5{,}1 \cdot 10^{21}$	$7{,}8 \cdot 10^{21}$	$4{,}5 \cdot 10^{17}$	$1{,}8 \cdot 10^{22}$
Φ (erg)	$14{,}9 \cdot 10^{-12}$	$13{,}4 \cdot 10^{-12}$	$10{,}8 \cdot 10^{-12}$	$10{,}5 \cdot 10^{-12}$
$\delta\varphi$ (Volt)	7,5	6,7	5,4	5,2

n sowie Φ und $\delta\varphi$ hat einen für jedes Metall charakteristischen Wert. Die Unterschiede verschwinden jedoch, wenn die Metalle eine Schicht von Calciumoxyd tragen. Die in diesem Fall erhaltenen Werte sind daher als dem Calciumoxyd eigentümliche Größen zu betrachten. n ist bei Calciumoxyd nur rund zweimal so groß als bei reiner Kohle, dagegen rund 10000 mal so groß als bei reinem Tantal. Φ und ebenso $\delta\varphi$ ist zwar in allen Fällen von derselben Größenordnung, jedoch haben, wie die Richardsonsche Formel zeigt, kleine Größenunterschiede von Φ oder $\delta\varphi$ bezüglich der Zahl der emittierten Jonen beträchtliche Unterschiede zufolge. Am kleinsten ist Φ für Calciumoxyd, am größten für Platin. n ist am größten für Calciumoxyd, am kleinsten für Tantal.

---

[1]) In der Tabelle 17 ist der Wert von n für Platin bei vorhandener Calciumoxydschicht (letzte Columne) rund 3,5 mal größer als bei fehlendem Calciumoxyd. Nach Wehnelt (loc. cit.) ist n im ersten Fall rund 1000 mal größer als im zweiten. Herr Prof. Dr. Wehnelt machte mich jedoch darauf aufmerksam, daß bei seiner Berechnung ein Irrtum vorgekommen sei.

C. Resultate der Versuche.

1. Platin, Kohle, Tantal und Nickel senden in glühendem Zustand bei fehlender und bei vorhandener Bedeckung mit Calciumoxyd negative Jonen aus. Die Beziehung zwischen Spannung und Strom trägt in allen diesen Fällen denselben Charakter. Es wurden überall ausgeprägte Sättigungsströme erhalten. Die geringste hierzu erforderliche Spannung lag stets zwischen 20 und 25 Volt. Die Richardsonsche Formel für die Beziehung zwischen Drahttemperatur und Sättigungsstrom findet sich bei allen Versuchen bestätigt.

2. Glühende, nicht mit Calciumoxyd bedeckte Platin-, Kohle-, Tantal- und Nickeldrähte unterscheiden sich beträchtlich bezüglich der Anzahl der von ihnen ausgesandten negativen Jonen d. h. der Stärke der Sättigungsströme. Desgleichen hat n, d. i. die Zahl der in 1 ccm des Metalles enthaltenen negativen Jonen, sowie Φ, d. i. die von einem Jon beim Verlassen des Metalles geleistete Arbeit, je einen für das betreffende Metall charakteristischen Wert.

3. Glühende, mit Calciumoxyd bedeckte Platin-, Kohle-, Tantal- und Nickeldrähte zeigen bezüglich der Anzahl der emittierten negativen Jonen keine Verschiedenheit. Die Werte von n und Φ sind in den vier Fällen die gleichen.

4. Die Zahl der ausgesandten negativen Jonen d. h. der Sättigungsstrom ist für ein und dasselbe Metall viel grösser bei vorhandener als bei fehlender Bedeckung mit Calciumoxyd.

5. Die erhöhte Emissionsfähigkeit von Calciumoxyd tragenden Drähten ist nicht verursacht durch einen modifizierenden Einfluss, den das Calciumoxyd auf das Austreten der negativen Jonen aus dem Metalle ausübt, sondern das Calciumoxyd selbst sendet die negativen Jonen aus.

6. Auf die Aussendung negativer Jonen aus glühendem Calciumoxyd hat das Metall, auf dem das Calciumoxyd sich befindet, auch dann keinen Einfluss, wenn die theoretisch gefundene Zahl der im Einheitsvolumen des Metalles enthaltenen negativen Jonen eine sehr beträchtliche ist. Es ist möglich, dass die negativen Jonen sich nicht ungehindert durch die Grenzfläche zwischen dem Metall und dem Calciumoxyd bewegen können, sodass die Zahl der hindurchpassierenden Jonen gegenüber den im Calciumoxyd vorhandenen für die Emission nicht in Betracht kommt.

7. Die Aussendung negativer Jonen aus glühenden Metallen hängt hienach bedeutend von der Natur der Metalloberfläche (Verunreinigungen durch Metalloxyde etc.) ab. Unregelmässige Abgabe negativer Elektrizität aus glühenden Metallen, wie solche häufig beobachtet wird[1]*, ist auf Veränderung der Metalloberfläche durch chemische Reaktion, Zerstäuben des Metalles und Freiwerden absorbierter Gase*[2]*) zurückzuführen.*

---

[1]) O. W. Richardson, Phil. Trans. 201, p. 518ff. 1903. H. A. Wilson, Phil. Trans. 202, p. 272/3. 1904.

[2]) H. A. Wilson, Proc. Roy. Soc. 72, p. 272. 1903. O. W. Richardson, Proc. Roy. Soc. 78, p. 192. 1906.

Die vorliegende Arbeit wurde in den Jahren 1906 und 1907 im physikalischen Institut der K. Universität Erlangen ausgeführt.

Meinem hochverehrten Lehrer Herrn Prof. Dr. E. Wiedemann, sowie Herrn Prof. Dr. A. Wehnelt und Herrn Prof. Dr. R. Reiger spreche ich an dieser Stelle für die Anregung und gütige Unterstützung bei der Ausführung der Arbeit meinen ergebensten Dank aus.

Lebenslauf.

Der Verfasser vorstehender Arbeit, Fritz Deininger, evangelischer Konfession, wurde als Sohn des K. Pfarrers Christian Deininger und dessen Ehefrau Karoline geb. Streiter am 5. Juli 1882 zu Ditterswind, K. Bezirksamt Hofheim, geboren. Er besuchte das Progymnasium in Kitzingen a. Main und darnach das Gymnasium in Ansbach, das er im Jahre 1901 mit dem Zeugnis der Reife verließ. In den folgenden Jahren studierte er an den Universitäten Erlangen und München Mathematik und Physik. Er hörte Vorlesungen in Erlangen bei den Herren Professoren Dr. E. Wiedemann, A. Wehnelt, R. Reiger, P. Gordan, M. Noether, O. Fischer, H. Lenk, E. Pechuël-Loesche und A. Roemer, in München bei den Herren Professoren Dr. K. Doehlemann, A. Voß, H. Brunn und K. Fischer. Im Jahre 1904 bestand er den ersten und im Jahre 1906 den zweiten Abschnitt des Lehramtsexamens. Die vorliegende Arbeit wurde in den Jahren 1906 und 1907 gefertigt.